

[气体回收]

SF₆ 气体循环利用技术的发展与应用

文/平高集团有限公司 张建飞 陆 静 刘朋亮 张鹏飞 范钦晓

介绍了六氟化硫 (SF₆) 气体回收与净化提纯等关键技术的发展现状, 按照电力行业 SF₆ 气体绝缘开关在生产制造、现场安装和运维检修等不同阶段, 对 SF₆ 气体循环利用技术的应用提出了指导意见, 并对 SF₆ 气体循环利用技术的经济效益和环境效益进行了分析。

六氟化硫 (SF₆) 气体因其优良的绝缘和灭弧性能, 被广泛应用于电气设备中。同时, SF₆ 气体也是一种温室气体, 其地球温度化系数 GWP (Global Warming Potential) 达到了 CO₂ 气体的 23 900 倍, 自然寿命高达 3 200 年以上, 是《联合国气候变化框架公约》要求重点控制的非能源活动温室气体。而且, 虽然 SF₆ 气体本身无毒, 但其分解物 (HF、SO₂、SOF₂、SOF₄ 和 SO₂F₄ 等) 有剧毒和强腐蚀性物质, 这些物质会直接影响人体健康。因此, SF₆ 气体的循环利用对于改善世界环境, 应对全球变暖影响深远。

SF₆ 气体绝缘开关的生产制造、试验和运维检修均涉及到 SF₆ 气体的泄露与排放。SF₆ 气体绝缘开关制造企业、筒体生产企业等在生产制造过程中, 需要频繁使用大量 SF₆ 气体进行检漏、试验, 使用过程中往往为了提高生产效率而将大量 SF₆ 气体排放到大气中; SF₆ 气体绝缘开关在运维检修时, 虽然对开关中使用过的 SF₆ 气体都进行回收, 但回收后仍存在大量残留 SF₆ 气体被排放到大气中。

随着社会节能减排与环保意识的提高, 政府的高度重视, 以及管理与技术的进步, 我国 SF₆ 气体的回收、

净化及再利用技术的研究取得了重要进展。国家电网公司发布的《2006 年社会责任报告》中, 明确提出减少污染物和废弃物排放, 回收再利用 SF₆ 气体的要求, 开展了多项 SF₆ 气体循环利用相关的科研项目, 研制出一系列 SF₆ 气体回收、净化处理设备, 并在电力行业推广应用。

SF₆ 气体循环利用技术简介

SF₆ 气体循环利用技术主要包括 SF₆ 气体回收技术、SF₆ 气体集中供气技术和 SF₆ 气体净化提纯技术。

1. SF₆ 气体回收技术

SF₆ 气体回收技术主要通过压缩机将开关气室里的 SF₆ 气体加压, 通过良好的散热装置使气体散热, 在温度不超过临界温度的情况下, 使 SF₆ 气体快速液化并储存在压力容器中; 当开关气室中 SF₆ 气体压力接近零表压时, 启动真空压缩机与压缩机联动运行进行负压回收, 直至开关气室中 SF₆ 气体被回收干净。目前常见的 SF₆ 气体回收设备按是否有油可分为无油回收装置和有油回收装置, 按回收效果可分为带负压回收装置 (回收率 99% 以上) 和不带负压回收装置 (回收率低于 94%)。

由于有油回收装置会将润滑油混入 SF_6 气体，不带负压回收装置回收率过低，因此推荐使用无油且带负压功能的回收装置。

2. SF_6 气体集中供气技术

SF_6 气体集中供气技术对 SF_6 气体进行集中存储，集中供气，可实现对开关气室 SF_6 的回收、充气及抽真空操作，并对回收进的 SF_6 进行干燥净化、储存、杂质气体分离及补气操作。各功能及操作主要由 SF_6 主机站房系统、子工作站、抽真空系统、 SF_6 补气系统、管路系统及各管路压力保护系统协同完成。 SF_6 气体集中供气技术可以实现开关制造过程 SF_6 气体的循环利用，回收速度在 $60 \sim 200 \text{ m}^3/\text{h}$ 以上，充气速度最高可达 $200 \text{ m}^3/\text{h}$ ，循环利用率达到 99% 以上，可以大幅提高生产效率，在减少 SF_6 气体排放的同时极大地降低了生产成本。目前国内外完全掌握 SF_6 气体集中供气技术的生产厂家较少，且均需要根据厂房、规模等实际情况进行定制设计，因此应用并不广泛。

3. SF_6 气体净化提纯技术

SF_6 气体净化提纯装置主要由吸附处理模块、动力单元模块、深冷分离模块及灌瓶模块组成。该技术具有二次净化提纯功能，确保净化后气体的质量。首次净化采用物理吸附技术，去除 SF_6 气体中水分、颗粒物等杂质。二次净化采用深冷分离技术，即根据 SF_6 的压力—温度特性曲线，利用无油压缩机进行增压，同时通过热交换器和制冷机组使高温高压气体快速降温，直至 SF_6 气体以液态方式或固态的方式储存到容器里，实现其他杂质气体的分离。通过二次净化，处理后的 SF_6 气体纯度达到 99.9% 以上，能够完全满足 GB/T 12022《工业六氟化硫》新气标准，通过注液泵将合格的 SF_6 气体注入到钢瓶或储气罐中循环使用。目前常见的 SF_6 气体净化提纯设备主要有固定式 SF_6 气体净化处理装置和移动式净化车。根据《国家电网公司工厂化检修基地建设指导意见》和《省级 SF_6 气体净化中心建设指导意见》，国网公司在 2012 年开始在系统内推广应用 SF_6 气体净化处理装置，已在全国建设省级 SF_6 气体净化中心 20 余个。

SF_6 气体循环利用技术的应用

在 SF_6 气体绝缘开关的生产制造、现场安装和运维

检修等不同阶段，由于 SF_6 气体的纯度、用气量和用气频率均有很大的不同，因此需要应用不同的技术手段实现 SF_6 气体的循环利用。

1. SF_6 气体绝缘开关的生产制造阶段

此阶段主要是在 SF_6 气体绝缘开关的生产厂家，一般使用 SF_6 气体进行检漏和出厂试验， SF_6 气体使用量大且需要循环使用。由于生产制造阶段用气情况一般较好，正常使用 SF_6 气体中只含有水分、氮气和氧气等杂质，此种场合仅需对 SF_6 气体进行干燥净化和初步的分离再生处理，使 SF_6 气体能够重复使用。因此在 SF_6 气体绝缘开关的生产制造阶段使用 SF_6 气体，建议建设 SF_6 气体集中供气站并辅助使用 SF_6 气体回收装置。当 SF_6 气体经多次重复使用后，会出现因杂质含量过高而影响使用的情况，此时需使用移动式净化车对 SF_6 气体进行净化提纯，或将气体灌装到钢瓶或 SF_6 气体储存容器中，运送至净化中心进行净化提纯。绝缘开关生产制造阶段 SF_6 气体循环利用流程如图 1 所示。

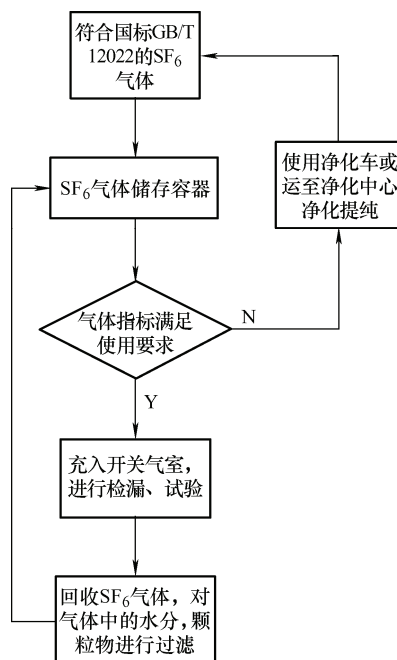


图 1 绝缘开关生产制造阶段 SF_6 气体循环利用流程

2. SF_6 气体绝缘开关现场安装阶段

此阶段主要是在变电站施工现场，对绝缘开关抽真空后，直接将 SF_6 气体充入即可。如果充入后检测 SF_6 气体不合格，则需要对 SF_6 气体进行回收处理，再重新充入。如果气体仅是水分含量超标，可直接使用 SF_6 气

体回收装置对 SF₆ 气体进行回收，回收装置对气体中的水分、颗粒物进行过滤后，再重新充入绝缘开关；如果 SF₆ 气体中混入了氮气等其他杂质气体，由于一般的 SF₆ 气体回收装置无法进行气体分离处理，所以需要使用移动式净化车对 SF₆ 气体进行净化提纯，或将气体灌装到钢瓶或 SF₆ 气体储存容器中，运送至净化中心进行净化提纯。绝缘开关现场安装阶段 SF₆ 气体循环利用流程如图 2 所示。

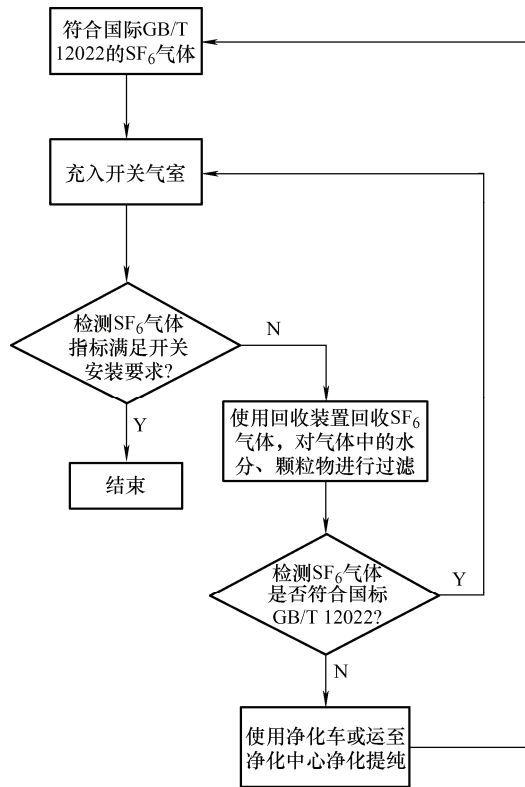


图 2 绝缘开关现场安装阶段 SF₆ 气体循环利用流程

3. SF₆ 气体绝缘开关运维检修阶段

此阶段主要是在变电站施工现场，需要先将开关中的 SF₆ 气体回收后，再将开关解体检修。如果开关未发生过放电现象，开关中的 SF₆ 气体仅水分含量超标，可直接使用 SF₆ 气体回收装置对 SF₆ 气体进行回收、除水处理，待检修结束后再重新充入绝缘开关。如果开关发生过放电现象，开关中 SF₆ 气体在电弧作用下会与氧（O₂）和水分（H₂O）发生分解反应，产生四氟化硫酰（SOF₄）、氢氟酸（HF）及二氧化硫（SO₂）等许多有毒有害且有腐蚀性的物质，对于此种含有放电分解物的 SF₆ 气体，必须先使用分解物预处

理装置将有毒有害的分解物进行吸附处理，再使用移动式净化车对 SF₆ 气体进行净化提纯，或将气体灌装到钢瓶或 SF₆ 气体储存容器中，运送至净化中心进行净化提纯。绝缘开关运维检修阶段 SF₆ 气体循环利用流程如图 3 所示。

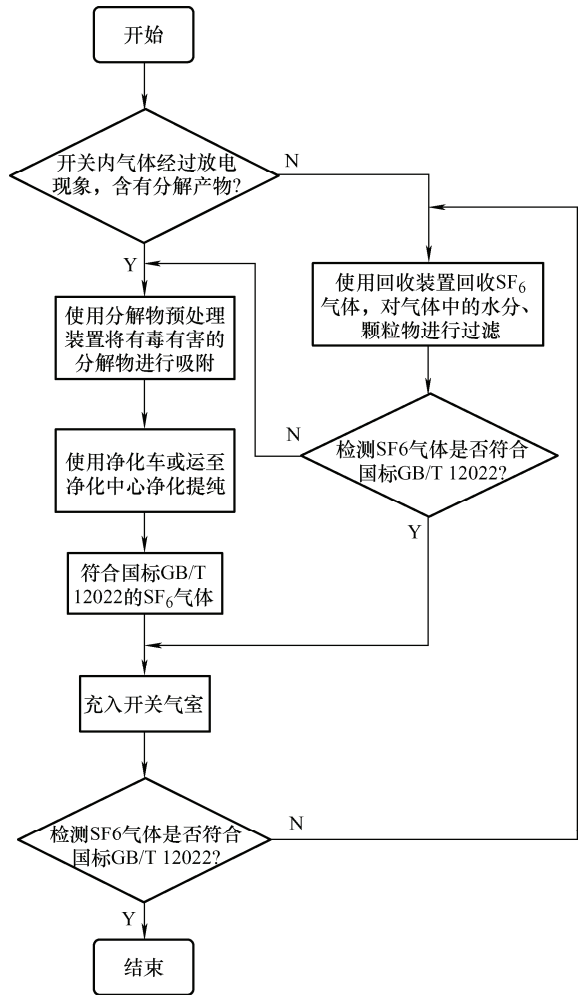


图 3 绝缘开关运维检修阶段 SF₆ 气体循环利用流程

效益分析

1. 经济效益

1) SF₆ 气体集中供气站和 SF₆ 气体回收装置回收利用率为 99%，比普通回收方式（回收率不超过 94%）每次可减少 5% 的 SF₆ 气体损耗，目前 SF₆ 气体市场售价为 4 万元/t，以一个中等开关制造企业每年循环气体量 600 t 为例，年经济效益为

$$\begin{aligned} \text{年节约气体购置费} &= \text{年循环气体量} \times \text{减少气体损耗} \times \\ &\quad \text{气体售价} = 600 \times 5\% \times 4 = 120 \text{ (万元)} \end{aligned}$$

（下转第 56 页）

升变化不超过 1℃。试验测得各个测温点的稳定温升如图 5 所示。



图 4 温升试验

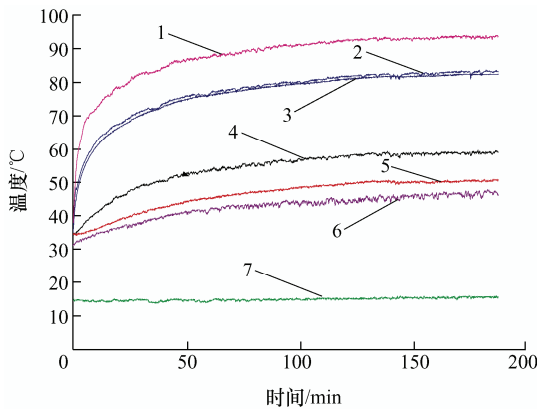


图 5 试验测试温升曲线

1—触点面 2—动触头座 3—静触头座 4—软连接
5—上进线端 6—下进线端 7—环境温度

从图 5 中可以看出，各测温点温度在通电后均开始上升，但是由于各点发热功率不同，散热功率也不同，所以温升上升速度不同，其中以触头接触面上升速度最快。在通电后 180 min，认定温升达到稳定值。结果显示，触头接触面的温升最高，动静触头座的温升次之，两者基本一致。

试验数据与计算数据对比见表 2，仿真与试验结果基本吻合，最高温度区域仿真计算准确度达 97.5%，试验结果说明本文对直流断路器的热分析是正确的，具有指导意义的。

表 2 温升仿真与试验数据 (单位:℃)

项目	触头	动触头座	静触头座	软连接	上进线端	下进线端
仿真	80	73	73	45	38	24
试验	78	70	71	50	34	30

结束语

通过对直流断路器温升影响因素的发热和散热因素分析和计算方法研究，进行了断路器温升仿真计算。根据仿真计算指导结构设计，制造样机通过试验验证，仿真计算准确度 97.5%，验证了仿真计算的正确性，为开展开关电器温升设计提供了理论依据和参考。EA

(收稿日期: 2021.03.04)

(上接第 38 页)

2) 净化中心或移动式净化车每年可净化提纯 SF₆ 气体 50 t 以上，年经济效益为
年节约气体购置费=气体售价×年净化处理气体量=
4×50=200 (万元)

2. 环境效益

SF₆ 气体对环境的影响主要有两方面：一是温室效应，SF₆ 气体的温室效应是 CO₂ 的 23 900 倍左右，是禁止向大气排放的六种温室气体之一；二是分解物毒性，部分分解产物有毒、有腐蚀性，对电气设备有腐蚀作用，对操作人员有人身危害，可能会导致设备或者人身伤害事故。

SF₆ 气体的循环利用技术的应用，极大地提高了 SF₆

气体的资源再利用率，减排了大量温室效应气体，同时对放电 SF₆ 气体分解产物进行吸附、中和，避免有毒有害气体的排放，对保护环境，维持生态平衡具有重要意义。

结束语

1) SF₆ 气体循环利用技术已经比较成熟，且已经在 SF₆ 气体绝缘开关的生产制造、现场安装和运维检修等不同阶段得到应用。

2) SF₆ 气体循环利用技术的推广应用，可以产生巨大的经济效益和环境效益，节约成本的同时保护了生态环境。EA

(收稿日期: 2020.11.03)